УДК 621.313

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МАШИН ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.В. Аристов

Томский политехнический университет
E-mail: avv@ido.tpu.edu.ru

Рассмотрены принципы действия и характеристики электродвигателей колебательного движения. Показаны перспективы развития колебательных электромеханических комплексов на базе электрических машин двойного питания. Даны физические основы формирования колебательного электромагнитного поля в машинах двойного питания при фазовой модуляции питающих токов.

Использование машины двойного питания (МДП) в современных автоматизированных системах позволяет существенно повысить технико-экономические показатели различных технологических установок, в том числе и электроприводов с периодическим законом движения. В первую очередь это связано с тем, сама МДП, как электромеханический преобразователь энергии, характеризуется высокими энергетическими показателями, обладает хорошей управляемостью, обеспечивая большой пусковой момент. Благодаря универсальности своих характеристик, вызванной различием соотношений чисел витков обмоток статора и ротора, их индуктивных сопротивлений, на базе МДП можно получить основные разновидности колебательных машин переменного тока: синхронную машину с постоянной амплитудой скорости в рабочем режиме, имеющую большой пусковой момент и плавную ресинхронизацию; асинхронную машину с мягкой механической характеристикой и большим пусковым моментом; шаговый силовой двигатель, в котором из-за большого пускового момента разгон машины до синхронной скорости можно достичь за время, соответствующее одному периоду намагничивающей силы поля статора без потери шага. Возможность изменять функции регулирования на обмотках вторичного элемента исполнительного двигателя по заданному алгоритму позволяет осуществлять в ней автоматическое регулирование перегрузочного момента в квазиустановившемся синхронном режиме при различных коэффициентах загрузки, в том числе и при нагрузке большей номинальной [1].

В таблице представлен ряд характеристик электродвигателей колебательного движения, с указанием названия фирм и выпускаемых ими установок. В ней отсутствуют колебательные электродвигатели, применение которых в большинстве случаев заведомо нецелесообразно, такие, например, как термо- и пневмоэлектрические, химико-тепловые и т.д.

Так, механические возбудители колебаний осуществляют преобразование вращательного движения исполнительного двигателя в механические прямолинейные или крутильные колебания, либо за счет эксцентрика, либо под действием центробежной силы, создаваемой, например, двумя вращающимися в противоположных направлениях одинаково не уравновешенными валами. Конструктивно они выполняются с малым радиусом кривошипа (эксцентрика) по сравнению с длиной шатуна, чем достигается приближение закона движения подвижного элемента вибростенда к гармоническому [2].

Принцип действия гидравлических двигателей основывается на циклическом реверсировании потока жидкости в грузовом цилиндре. Эффективность их работы зависит от способности механизма от цикла к циклу возвращать и рекуперировать энергию колеблющихся масс с использованием ее для последующего движения. Предельные энергетические возможности гидровозбуждения в значительной мере зависят от количества рабочей жидкости, участвующей в возбуждении, что не позволяет полностью использовать мощность привода на низких частотах (ед. Гц). Они обладают большой грузоподъемностью и предназначены в основном для испытания строительных конструкций на сейсмостойкость [3].

Преимуществами двигателей электрогидравлического и магнитогидравлического типов являются возможность использования большой энергоемкости гидравлических исполнительных механизмов, достаточная точность и быстродействие, простота достижения значительных усилий и больших амплитуд колебаний на низких частотах. В силу своей упругости жидкость в исполнительном механизме действует как пружина, что приводит к резонансу на частотах, определяемых суммой масс испытуемого объекта и подвижных частей возбудителя колебаний. На частотах выше резонансной усилие возбудителя колебаний уменьшается, ввиду возрастания расхода рабочей жидкости. Несмотря на то, что в рекламных проспектах ряда ведущих фирм, выпускающих электро- и магнитогидравлические двигатели, часто указываются верхние частоты рабочего диапазона до 200...500 Гц, рассматриваемые возбудители механических колебаний практически неработоспособны. Амплитуда вибросмещения на таких частотах составляет доли мкм, а фазовые характеристики таковы, что существенно затрудняет точное автоматическое управление заданным режимом [4].

Переменное усилие, возбуждаемое в магнитомеханических двигателях, является функцией магнитной силы и изменения магнитного сопротивления магнитной системы в зависимости от скорости вращения ротора. Преимущества этих возбудителей заключаются в постоянстве создаваемого переменного усилия независимо от частоты его колеба-

Таблица. *Состояние технического уровня современных электродвигателей колебательного движения*

Типы электродвигателей колебательного движения	Диапазон рабочих частот, Гц	Макс. амплитуда колебаний, мм	Максимальное ускорение, м/с^2	Коэффициент гармоник, %	Вид колебаний	Типы промышленных установок
Механические (кривошипно-шатунные, эксцентриковые)	0,1...2,5 12...200	5...500 0,05...1	125 4...80	– –	линейные линейные	ВУС 500/200; ВМС5-3; УВ70-200 (Россия); ST-30/3; ST-80/5 (Германия); EX-30; UB-2000A (Япония); RV-15-30; VMJ-2HB (США), ENAR (Испания)
Гидравлические (объемного, проточного действия)	1...300 0...500	5 10	300 1000	20 20	линейные линейные	УГВ10/150; ВСГ-1; ВС-1;ВП-100 (Россия); 800; 10 (Лозенхаузен), ФРГ); Р781; РВ134 (Амслер, Швейцария)
Магнитомеханические	10...2500	0,05	2000	10	линейные	«Вибратор»
Электромагнитные	20...600 40...300	2 1,5	–	5 8	линейные линейные	ЭВМ-1 (Россия); «Виброфор» (Амслер, Швейцария)
Электродинамические	5...5000 20...10000	12,5 10,9	440 100	10 –	линейные линейные	ВЭДС-200А; ЭДВ-13; АГАТ-80; ВСВ - 133 (Россия); V-1000B (В. Британ-Саваж, Великобритания); V-50MK1; VG-109MK1 (Гудманс, Великобритания); LPM25 (Пай-Линг ЛТД, Англия: ассоциация «Линг Электроникс» США); VE3200; RF-0005; XL-1400 (Япония)
Электрогидравлические и магнитогидравлические	0,05...50 1...100	400 100	300 120	18 20	линейные линейные	ЭГВ-1-300; ЭГВ-20-200 (Россия); HS-1005; HS-1100 (ИМВ Лаб. КО., ЛТД, Япония); SEV63-100-16; SEV160-160-63 (Инова, Чехия); 205.31; 205.51; 208.11; 208.51 (МТС, США)
Электромашинные на базе двигателей переменного тока	$10^{-3}...10^{3}$ $10^{-3}...4{\cdot}10^{3}$	$10^{-2}...5\ 10^{3}$ $10^{-3}...10^{3}$	$10^{-1}...10^{4}$ $5{\cdot}10^{-2}...10^{4}$	2 0,1	линейные угловые	–

ний, легкости регулирования переменной силы во всем диапазоне рабочих частот, за счет изменения тока возбуждения электромагнита, малом сопротивлении движению якоря. Форма колебаний магнитомеханических возбудителей близка к синусоидальной и определяется видом зубцов ротора и вставок якоря. Однако значительный момент инерции вращающегося ротора затрудняет быстрое изменение частоты колебаний [5].

В электромагнитном возбудителе колебаний вследствие протекания по обмоткам переменного тока, якорь испытывает втягивание в воздушный зазор дважды за период переменного тока. Таким образом, переменное усилие определяется произведением переменного тока на некоторый конструктивный коэффициент, зависящий от числа витков обмотки возбуждения и воздушного зазора между якорем и полюсом магнитной системы. Применяются электромагнитные возбудители колебаний преимущественно для возбуждения колебаний в резонансных вибростендах, настроенных на заданную частоту излучения, которые в основном используются для калибровки и аттестации виброизмерительной аппаратуры [6, 7].

Принцип работы электродинамического возбудителя механических колебаний основан на взаимодействии переменного тока, протекающего по проводнику, с постоянным магнитным полем. Несомненным достоинством их является возможность простыми средствами производить регулирование по развиваемой силе, амплитуде перемещения, скорости или ускорению, однако данный класс двигателей плохо работает на частотах ниже 5 Гц [8].

В электрострикционных и магнитострикционных колебательных двигателях используются эффекты изменения размеров тел из соответствующих материалов под воздействием электрического (закон Липпмана) и магнитных (закон Джоуля) полей.

Они обладают простотой конструкции, но имеют малую амплитуду колебаний ($10^{-5}...10^{-2}$ мм) и не позволяют регулировать закон колебания. Частотный диапазон магнитострикционных и электрострикционных двигателей лежит в пределах $10^{3}...5{\cdot}10^{5}$ Гц [9].

Сравнительный анализ показывает, что несмотря на большое количество различных модификаций, применение большинства из двигателей в автоматизированных системах значительно ограничено. Это связано, в первую очередь, с наличием дополнительных звеньев преобразования движения, трудностями с конструированием механизма, обеспечивающего плавное изменение амплитуды колебаний рабочего стола в процессе испытаний без остановки установки, отсутствием возможности формирования регулируемых по частоте, амплитуде и форме колебаний, отличных от гармонических.

Наибольшую область потребных амплитуд и частот обеспечивают безредукторные электромашинные колебательные привода, построенные на

базе электрических машин переменного тока и в частности – МДП. Они не имеют теоретически ограничения по амплитуде в области низких частот при создании угловых колебаний, а при линейных эти ограничения связаны лишь в основном с конструктивными параметрами применяемых двигателей. Обладая высокой управляемостью они позволяет обеспечивать почти все возможные разновидности колебательного движения.

В последнее десятилетие рядом зарубежных фирм разработаны новые типы машины двойного питания. В частности, фирмами "Mitsubishi", "Toshiba", "Siemens" уже начат серийный выпуск бесконтактных асинхронизированных двигателей, что позволяет ожидать от них при работе в режиме вынужденных колебаний, показателей, превышающих показатели серийно выпускаемых вибростендов.

Формирование колебательного режима работы в МДП осуществляется за счет создания качающегося электромагнитного поля в воздушном зазоре двигателя, например, в результате балансно-амплитудной, частотной или фазовой модуляции фазных потокосцеплений по обмоткам первичного (статора, индуктора) и вторичного (ротора, бегуна) элементов [10]. При этом формируемые качающиеся электромагнитные поля обмоток могут взаимоскладываться или вычитаться.

Если предположить, что магнитная система электрической машины ненасыщенна, то о характере изменения магнитного поля в воздушном зазоре можно судить по пространственному положению результирующего вектора потокосцепления.

Так, при фазовой модуляции, аналитические выражения обобщенных векторов фазных потокосцеплений обмоток статора s и ротора r при разночастотном питании симметричной в электрическом и магнитном отношении МДП имеют вид

$$\overline{\psi}_s = \psi_s e^{j\varphi_s};$$

$$\overline{\psi}_r = \psi_r e^{j\varphi_r},$$

где $\psi_s = \psi_{ms}\sqrt{\sin^2(\omega_1 t+\alpha)+\cos^2(\omega_2 t+\beta)};$

$$\psi_r = \psi_{mr}\sqrt{\sin^2(\omega_1 t+\alpha)+\cos^2(\omega_2 t+\beta)};$$

$$\varphi_s = \varphi_r = \operatorname{arctg}\frac{\sin(\omega_1 t+\alpha)}{\cos(\omega_2 t+\beta)}.$$

Здесь ψ_{ms}, ψ_{mr} – амплитудные значения фазных потокосцеплений обмоток электрической машины; ω_1, ω_2, α, β – круговые частоты и начальные фазы фазных потокосцеплений. Введя масштабный коэффициент $\mu=\psi_{mr}/\psi_{ms}$, перемещение пространственного результирующего вектора потокосцепления 0 в воздушном зазоре относительно первичного элемента двигателя можно описать законом

$$\chi_0 = \arg[\psi_0] = \operatorname{arctg}\frac{\sin(\omega_1 t+\alpha)}{\cos(\omega_2 t+\beta)} \pm \operatorname{arctg}\frac{\mu\sin\chi}{1+\mu\cos\chi}, \quad (1)$$

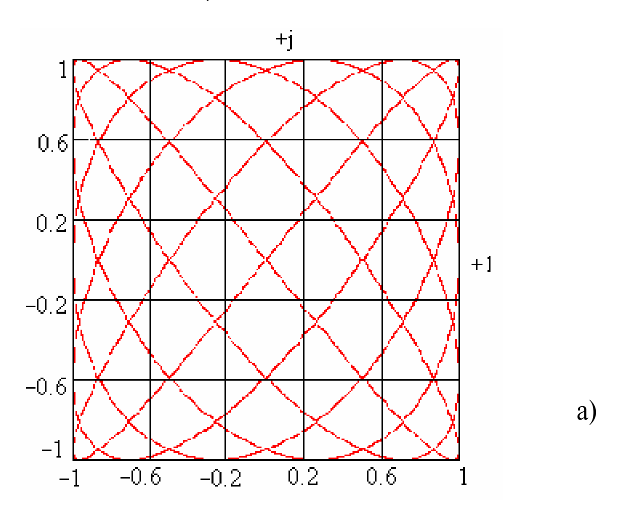
где знак "+" соответствует согласному, а "–" – встречному включению электромагнитных полей соответственно обмоток s и r; χ – закон движения подвижного элемента двигателя. Причем для двигателей углового движения $\chi_0 = \varphi_0$, а для двигателя прямолинейного движения $\chi_0=\pi{\cdot}x_0/\tau$, где x_0 – линейная координата вектора ψ_0; τ – полюсное деление.

Анализ выражения (1) показывает, что в отличие, например, от асинхронных машин, работающих в режиме вынужденных колебаний, в машинах двойного питания происходит дополнительная модуляция электромагнитного поля по фазе, за исключением случая идеального холостого хода, при условии $\mu = 1$

$$\chi_0 = 2\operatorname{arctg}\frac{\sin(\omega_1 t+\alpha)}{\cos(\omega_2 t+\beta)}.$$

Аналогичную модуляцию по амплитуде претерпевает и модуль пространственного результирующего вектора потокосцепления ψ_0:

$$\psi_{m0} = \psi_s\sqrt{(1+\mu\cdot\cos^2\chi)^2+\mu^2\sin^2\chi}. \quad (2)$$



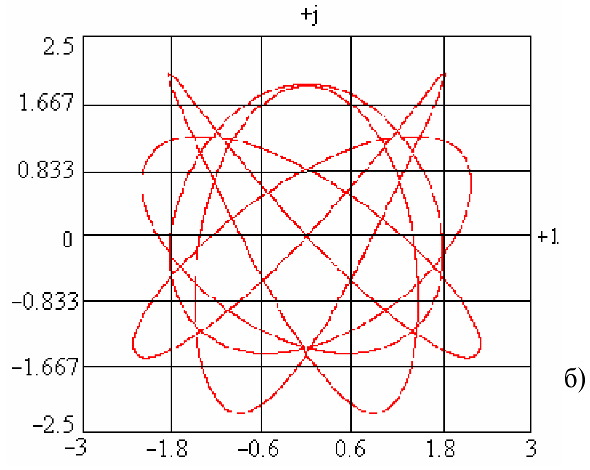


Рис. 1. *Годографы векторов Ψ_0 при фазовой модуляции питающих напряжений (токов) а) АД и б) МДП; ω_1=10, ω_2=9, α=β=0*

В результате годограф результирующего вектора потокосцепления МДП существенно отличаются от годографа асинхронного двигателя (АД). В качестве примера на рис. 1 представлены годографы результи-

рующих векторов потокосцеплений для АД (*а*) и МДП (*б*) при учете первой гармоники закона движения подвижного элемента двигателя $\chi=\chi_m \sin[(\omega_1-\omega_2)t+\varphi]$, для $\chi_m=1$, $\omega_1=10$ с$^{-1}$, $\omega_2=9$ с$^{-1}$, $\alpha=\beta=\varphi=0$.

Так как закон движения подвижного элемента исполнительного двигателя по существу повторяет закон движения электромагнитного поля, то, согласно (1), можно с уверенностью заключить, что при всех прочих равных условиях работа МДП в режиме вынужденных колебаний характеризуется более высокими выходными параметрами, в качестве которых для систем с периодическим движением вала (штока) принято рассматривать: амплитуду координаты движения подвижного элемента двигателя или его усилия, скорость и ускорение.

Наличие дополнительной модуляции колебательного электромагнитного поля МДП в зависимости от координаты подвижного элемента двигателя $\chi(t)$ оказывает существенное влияние на процессы энергообмена в электродвигателях колебательного движения. Причем, чем больше амплитуда χ_m, тем сильнее искажается модуль пространственного результирующего вектора потокосцепления ψ_{m0} (рис. 2), и тем сильнее наблюдаются высокочастотные пульсации в кривой скорости электромагнитного поля

$$\omega_0 = \frac{1}{2}\left\{\frac{(\omega_1+\omega_2)\cos(\Omega t+\alpha-\beta)+\Omega\cos[(\omega_1+\omega_2)t+\alpha+\beta]}{\sin^2(\omega_1 t+\alpha)+\cos^2(\omega_2 t+\beta)}\right\}+ +\left[\omega\,\mu\frac{\mu+\cos\chi}{1+2\mu\cdot\cos\chi+\mu^2}\right],$$

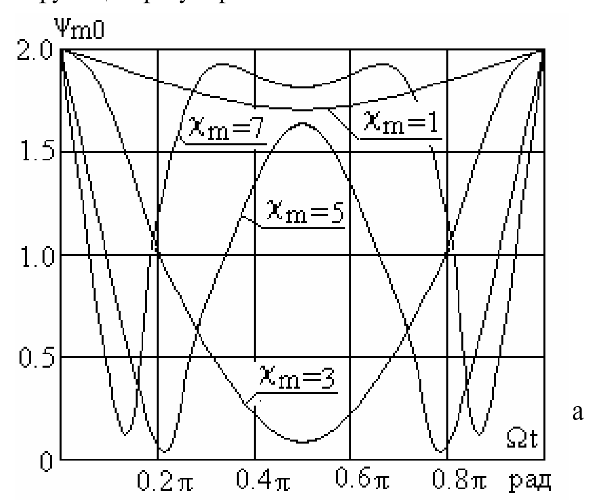
где ω – скорость движения подвижного элемента двигателя. Все это приводит к существенному изменению как статических, так и динамических характеристик колебательной системы.

В первую очередь это связано с тем, что при совершении колебательного движения исполнительный двигатель успевает работать в течение одного периода колебания в режимах электромагнитного тормоза "Т" ($\infty \geq s > 1$), двигателя "Д" ($1 \geq s \geq 0$) и генератора "Г" ($0 \geq s \geq -\infty$), и наличие дополнительных пульсаций скорости поля (ω) приводит к перераспределению временных интервалов этих режимов.

Процессы внутреннего энергообмена между электрической машиной и сетью повторяются периодически с удвоенной частотой колебаний. В двигательном режиме электрическая машина, потребляя из сети активную мощность, запасает кинетическую и потенциальную энергии в инерционных и позиционных составляющих нагрузки, а в генераторном и тормозных – компенсирует запасенную в нагрузке энергию до момента полного возврата колебательной системы в исходное состояние.

Как и для электромеханических систем однонаправленного движения, режим компенсации при колебательном движении может осуществляться с отдачей энергии в сеть (генераторный режим) или с потреблением энергии из сети (режим динамического торможения). Поэтому, естественным путем улучшения энергетических характеристик исполнительного двигателя видится в увеличении режима рекуперативного торможения.

Во-вторых, наличие компенсирующей составляющей модуля пространственного результирующего вектора потокосцепления (2), вызванной наличием электромагнитной обратной связи по положению $\chi(t)$, позволяет формировать в МДП резонансный режим работы. Последний, как известно, характеризуется высокими энергетическими и динамическими показателями. Однако, при разработке таких систем возникает задача синтеза параметров колебательного электродвигателя, обеспечивающего статическую устойчивость колебательного комплекса при заданных параметрах нагрузки и функций регулирования.



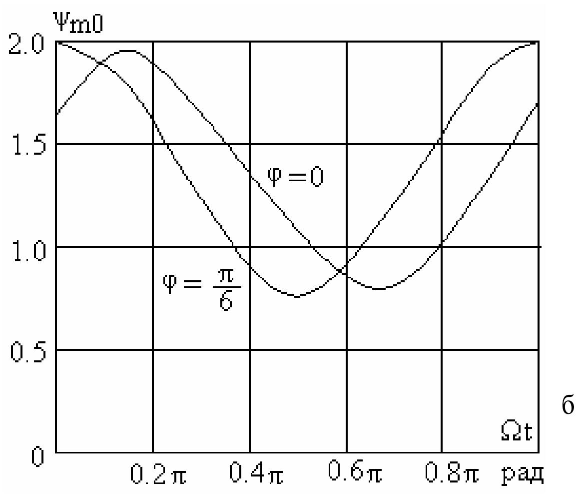


Рис. 2. *Влияние а) амплитуды χ_m и б) начальной фазы φ колебаний вторичного элемента МДП на модуль пространственного результирующего вектора потокосцепления ψ_{m0}*

Оценивая возможности существующих электродвигателей колебательного движения в плане построения современных колебательных комплексов, можно заключить, что наиболее целесообразно решать эту задачу на основе использования управляемых машин переменного тока, в качестве которых могут быть использованы как электричес-

кие машины серийного изготовления (асинхронные машины с фазным или короткозамкнутым ротором), так и специально спроектированные для работы в режиме вынужденных колебаний. Причем, если в первом случае использование серийных машин предполагает дополнительные меры, направленные на доработку механических частей двигателя, то во-втором – следует ожидать более высокие технико-экономические показатели, так как машина проектируется непосредственно для конкретно заданной установки, с учетом свойств всех остальных элементов, входящих в данный колебательный комплекс.

Несомненно, целесообразность использования электрических машин переменного тока, и в первую очередь МДП, в режиме колебательного движения продиктованы, с одной стороны, хорошей управляемостью электромеханических преобразователей энергии и их высокой совместимостью со средствами вычислительной техники, а с другой – высокой надежностью и низкой стоимостью, благодаря отработанной технологии при их производстве. Анализ современного состояния и перспектив развития безредукторных колебательных комплексов на базе электрических машин переменного тока указывает на тенденцию создания таких машин, обладающих высокими динамическими и энергетическими характеристиками. Применение с этой целью МДП позволяет существенно расширить потребный диапазон угловых (линейных) колебаний по развиваемому усилию до 2000 Н, повысить энергетические показатели в 1,2...1,6 раза, получить новые функциональные возможности электропривода колебательного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В. Вопросы исследования, разработки и практического внедрения электроприводов колебательного движения с машиной двойного питания // Современные проблемы энергетики, электромеханики и электротехнологии. – Ч. 2. – Екатеринбург: Изд-во УПИ, 1995. – С. 234–236.
2. Гладков С.Н. Электромеханические вибраторы. – М.: Машиностроение, 1966. – 83 с.
3. Соустин Б.П., Тестоедов Н.А., Рудометкин А.Г., Алькин А.В. Виброиспытания космических аппаратов. – Новосибирск: Наука, 2000. – 175 с.
4. Захаров Ю.Е. Исследование гидравлических и электрогидравлических вибраторов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М.: МВТУ, 1974. – 41 с.
5. А.с. 1374359 СССР. Вибратор / И.Х. Хайруллин, Ф.Г. Тимершин, Р.Д. Файзуллин. Б.И. 1988. – № 6.
6. Woodward H.E., Nestories E.J., Russell A.E. An electromagnetic vibration exciter. [British Internal Combustion Engine Research Inst. Ltd]. № 2645/76. – 1978.
7. Прохоренко Е.В. Разработка и исследование вибрационного электромагнитного двигателя. Автореф. дис. ...канд. техн. наук. – Новосибирск, 2003. – 19 с.
8. Wolf H. Elektrodynamische Schwingerregor // Elin-Z. – 1978. – V. 30. – № 2. – P. 60–68.
9. Кратинов А.Г. Магнитострикционный электровибропривод // Конструирование и производство транспортных машин. – 1980. – № 12. – С. 124–127.
10. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

УДК 62-83